SÄRTRYCK UR:

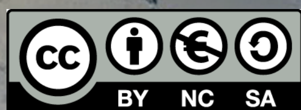
KOSMOS
PLANETEN JORDEN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2018



MOT ETT VARMARE KLIMAT

© PÄR HOLMGREN



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning gäller samma upphovsrättsliga regler som för källan.

SVENSKA FYSIKER SAMFUNDET

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM



Pär Holmgren
är kanske mest känd från sin karriär som tv-meteorolog under 90-talet och början av 00-talet. Han var tidigt starkt engagerad i klimatfrågan, och har medverkat i en lång rad föreställningar, föredrag och böcker i ämnet. 2010 startade han bokförlaget Pärspektiv, med fokus på frågor kring miljö och hållbarhet. Hans senaste bok heter *Det minsta vi kan göra är så mycket som möjligt*. Sedan 2015 arbetar Pär som naturskadespecialist vid Länsförsäkringar.

Bild: Peter Knutson

Det råder idag inte längre någon tvekan om att vi går mot ett allt varmare klimat, och att det är vi människor som är huvudorsaken. Men de bakomliggande mekanismerna är komplicerade, och de exakta följderna svåra att förutse. Pär Holmgren reder ut den knepiga klimatfysiken, och förklarar varför det är hög tid att ta politiskt ansvar i frågan.

Mot ett varmare klimat

Klimatfrågan är en teoretisk utmaning. För att bedöma klimatsystemets känslighet, eller för att beskriva samspelet mellan naturliga variationer och mänsklig påverkan, är det avgörande att man förstår den komplicerade atmosfärsfysiken.

Samtidigt är det i samhällsdebatten viktigt att sätta in frågan i ett större sammanhang. Här räcker det inte att prata om miljondelar koldioxid och subtila temperaturförändringar – aspekter som för en meteorolog kanske är tillräckliga både för att fånga intresset och visa allvaret. Men det är ju inte temperaturförändringarna i sig som är problemet, utan följdverkningarna av dem; hur den globala uppvärmningen påverkar exempelvis matförsörjning och tillgång till rent vatten i olika delar av världen. Mer och mer blir klimatfrågan en humanitär rättvisefråga. Det handlar om rättvisa mellan olika generationer och rättvisa mellan olika länder.

Växthuseffekten fungerar inte som ett växthus

För att förstå vad som händer med klimatet är det enklast att börja med växthuseffekten, för utan den skulle det inte finnas någon klimatförändring. Vi hade inte haft några andra problem heller. Utan en naturlig växthuseffekt hade vi med största sannolikhet inte haft något liv på jorden. Solen är lite för ljussvag och lite för långt bort för att ge vår planet tillräckligt med energi, om det inte vore för de växthusgaser som finns i jordens atmosfär. Möjligen hade någon mycket enkel livsform utvecklats, kanske i smältvatten i närheten av ekvatorn på en i övrigt istäckt planet.

Växthusgaserna i jordens atmosfär gör att en del av värmen från solen stannar kvar i hav och atmosfär. I korthet fungerar det så här:

Energin från solen strålar ut i alla riktningar. En del av solens strålar når fram till jorden där strålningen delvis reflekteras

tillbaks mot rymden – av till exempel moln, snö och is – men det mesta når marken och havet. Hur mycket som reflekteras beskrivs av det så kallade *albedot*, som är ett mått på reflexionsförmågan, eller den andel av strålningen som reflekteras av en belyst yta. Ett albedo på 1,00 innebär att allt ljus reflekteras och ett albedo på 0,00 betyder att inget ljus reflekteras. Jordens albedo är i genomsnitt 0,3. Det innebär att 30 % av solens strålar reflekteras tillbaks ut mot rymden.

En solig dag tar jorden emot mer energi än den förlorar fram till 14–15-tiden. Det blir helt enkelt varmare. Men jorden avger hela tiden även värme i form av långvågig infraröd strålning. Från eftermiddagen och tills solen har kommit en liten bit upp på himlen nästa morgon avger mark och hav mer energi än vad som tas emot. Det blir kallare, och efter en klar och vindstilla natt är det som kallast lite efter soluppgången.

Den inkommande strålningen kan vi till stor del se. Våra ögon är anpassade till den kortvågiga strålning som vi uppfattar som synlig. Den utgående, långvågiga strålningen, kan vi däremot inte se med våra ögon.

På motsvarande sätt som under dygnet blir det på det norra halvklotet ett överskott av energi från februari till början av augusti. Då stiger temperaturen i genomsnitt, för att sedan sjunka under slutet av sommaren, hösten och inledningen av vintern, då det blir ett underskott av energi. Här i Sverige är det i genomsnitt som varmast kring månadsskiftet juli-augusti, och som kallast i slutet av januari eller början av februari.

Utan växthuseffekten hade solen inte klarat av att värma planeten mer än till en medeltemperatur omkring −18 grader, förutsatt att jordens albedo skulle vara ungefär detsamma som nu. Men med ett kallare klimat hade en större del av planeten antagligen varit täckt av is och snö. En ”vitare planet” hade haft ett mycket högre albedo, vilket i sin tur innebär att mer av den inkommande solstrålningen hade reflekterats bort, och i praktiken hade det därför varit betydligt kallare än −18 grader i genomsnitt.

Det som händer på en planet med en atmosfär som innehåller växthusgaser är att dessa gaser fångar upp en del av den långvågiga strålningen som lämnar planeten, medan den kortvågiga inkommande solstrålningen inte påverkas (se sidorutan på sid 66–67). Det blir ungefär som i ett växthus, där glaset inte stänger ute särskilt mycket av solens energi, men håller kvar värmen längre.

Men i ett växthus är det som gör att värmen hålls kvar, helt enkelt att glaset hindrar den uppvärmda luften från att ta sig därifrån. När det gäller planeten däremot, hålls värmen kvar genom att värmestrålningen från dess yta fångas upp av vissa gasmolekyler i atmosfären, som sedan skickar iväg strålningen igen åt alla möjliga håll. Så småningom läcker värmestrålningen ändå ut i rymden. Men ju mer växthusgaser, desto längre studsar värmestrålningen runt i atmosfären. Mer växthusgaser leder därför till ett högre energiinnehåll i atmosfären – det blir varmare.

När det gäller jorden innebär det för närvarande att vi har en genomsnittlig temperatur på cirka 14 plusgrader, alltså åtminstone 32 grader varmare än utan växthusgaser i atmosfären. Det är den genomsnittstemperaturen som livet på jorden har anpassat sig till under de senaste tusentals åren, och då inte minst vårt eget moderna samhälle.

Det finns flera växthusgaser. Den viktigaste är vattenångan. Näst störst effekt har koldioxiden. Eftersom de olika växthusgaserna delvis påverkar samma våglängder av strålningen är det svårt att säga exakt hur mycket respektive gas bidrar med. Men vattenångan står för i storleksordningen 40–70 procent, medan koldioxiden står för 10–25 procent. Av övriga växthusgaser bidrar metan (CH_4) och dikväveoxid (N_2O), det vill säga lustgas, med cirka 5 procent var. Även ozon och olika halokarboner påverkar. Halokarboner är gaser där kolet är bundet till en halogen – klor, brom eller fluor. Dessa gaser kallas ibland även för freoner, vilket ursprungligen var ett handelsnamn för ett köldmedium. Även om de förekommer i mycket små mängder i atmosfären kan de vara mycket långlivade, stabila, och ha en mycket större förmåga att per molekyl värma upp atmosfären än koldioxiden. (Se även sidorutan *De andra växthusgaserna* på sid 61.)

Jordens atmosfär består av omkring 78 % kväve och 21 % syre, frånsett vattenångan. Av övriga gaser är argon den vanligaste. Dessa tre gaser är inte växthusgaser eftersom deras fysiska egenskaper gör att de inte växelverkar med värmestrålningen, men de utgör tillsammans hela 99,96 % av den torra delen av atmosfären. Den del av växthuseffekten som inte har att göra med vattenångan, beror alltså på ett antal gaser som finns i ytterst små mängder i luften runt omkring oss.

Klimatet har alltid varierat

Jordens klimat har varierat kraftigt genom den geologiska historien. Det har funnits perioder med såväl betydligt varmare som betydligt kallare klimat än vad vi har idag. Under den senaste istiden, för ungefär 10 000–100 000 år sedan, var det exempelvis 5–10 grader kallare än vad det varit under den värmeperiod som jorden befunnit sig i de senaste cirka 10 000 åren.

Studerar vi klimatvariationer över tiotals eller hundratals miljoner år är kontinentalförskjutningar oftast den viktigaste anledningen. På den långa tidsskalan påverkar kontinenternas läge såväl havsströmmar som förutsättningarna för glaciärer att bildas vid polerna. På en kortare tidsskala, över årtionden och århundraden, kan vulkanism och variationer i solfläckscykeln påverka mycket.

Förutom dessa kortare variationer i solens intensitet har dessutom solen förändrats som stjärna sedan solsystemet bildades för cirka 4,6 miljarder år sedan. Solen blir långsamt ljusstarkare, med i storleksordningen 10 % per miljard år. Och på den här, för klimatet allra längsta tidsskalan, har dessutom sammansättningen av jordens atmosfär ändrats.

Jordens ursprungliga atmosfär bestod främst av väte, och troligen även vattenånga, metan och ammoniak – ungefär som hos solsystemets yttre jätteplaneter idag. Efter cirka en miljard år bestod sedan atmosfären främst av kväve och koldioxid, främst på grund av vulkanutbrott i jordens allra tidigaste historia. Trots att solen då var cirka 30 % svagare än idag, var klimatet ändå tillräckligt varmt för att liv skulle kunna uppstå. Det tack vare en mycket kraftfullare växthuseffekt än idag. Men när livet sedan väl startade, i världshavet, gjorde fotosyntesen att det mesta av kolet försvann från atmosfären – och ersattes av syre. Nu hade ytterligare ungefär en miljard år gått sedan solsystemet bildades, och syret i atmosfären gjorde det efterhand möjligt för nya livsformer att utvecklas – djur som andades syre. Och kolet från den tidigare atmosfären lagrades sakta men säkert undan i bergarter, och under vissa förutsättningar även i form av naturgas, olja och stenkol. Alltså den fossila energi som vi människor nu under de senaste hundratals åren tagit upp ur jordens inre.

När växthuseffekten blir starkare eller svagare

Under den nuvarande geologiska eran *kvartär*, som startade för 2,6 miljoner år sedan, kan vi dock bortse från de långsammare

processerna. Kontinenterna har inte rört sig tillräckligt mycket för att nämnvärt påverka havsströmmarna, och solen bara blivit någon tiondels promille ljusstarkare. Trots de stabila förutsättningarna har jorden under hela denna period gått in och ut ur återkommande istider – inte minst beroende på variationer i halten av växthusgaser.

Den viktigaste orsaken till växlingarna mellan istider och mellanliggande värmeperioder är mycket små och långsamma variationer i planetens bana kring solen och i jordaxelns lutning. En istid inleds oftast med att den inkommande solenergin till norra halvklotet minskar något. Det södra halvklotet är mindre känsligt för de här variationerna, främst för att det i princip är ett vattenhalvklot med den mycket stabila stora glaciären på Antarktis vid sydpolen. När förutsättningarna förändras på det norra halvklotet kan det däremot leda till att isen breder ut sig över större områden. Det leder i sin tur till att mer solenergi reflekteras bort från jorden – planetens albedo ökar. Haven blir dessutom bättre på att lagra kol när de blir kallare. Sakta minskar koldioxidhalten i atmosfären. Växthuseffekten avtar. Det blir kallare, och isen breder ut sig ännu mer.

Samma process – men omvänd – sätts igång när en istid går mot sitt slut. Då börjar i stället, på grund av de små och långsamma astronomiska variationerna, mer energi komma in mot det norra halvklotet. Den här kedjan av processer kallas ibland för självförstärkande återkopplingar. Det är alltså små förändringar som efterhand leder till en betydligt större effekt.

Den här eftersläpningen från påverkan till full effekt kan jämföras med att det inte är som varmast mitt på dagen, när solen står som högst på himlen, eller att det inte är som varmast under året vid midsommar. Så länge som det är en obalans, med mer energi som kommer in till jorden än vad som strålar ut mot rymden, fortsätter det att bli varmare. Och just den eftersläpningen är i själva verket kanske det allvarligaste problemet med den obalans som vi människor nu har skapat genom att förstärka växthuseffekten.

Människan och våra förfäder har levt genom några av dessa cykler med svängningar mellan istider och värmeperioder – vilka kallas *Milankovichcykler*, efter den ryske geolog som först lade fram hypotesen om dem. De har inneburit stora utmaningar, men har troligen även spelat en avgörande roll för att människan skulle få en möjlighet att befolka alla kontinenter – förutom Antarktis.

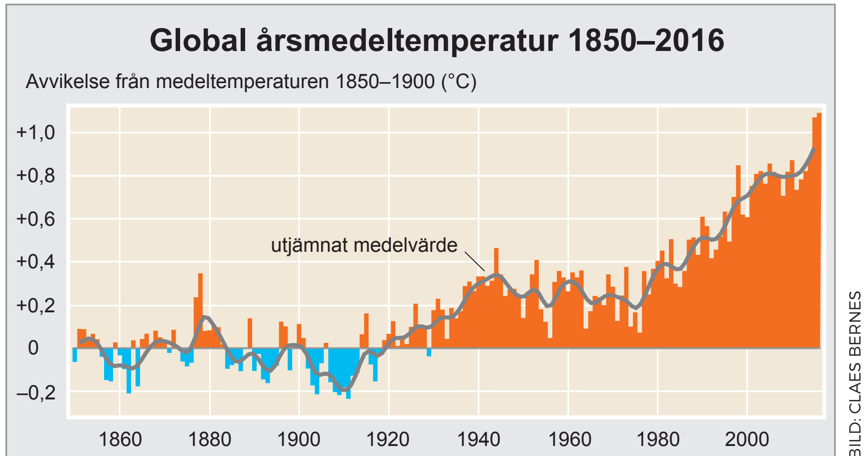
Den senaste istiden – som inleddes för cirka 130 000 år sedan – tvingade antagligen många människor att lämna trakter där de vant sig att jaga och fiska, men samtidigt öppnades nya möjligheter i andra delar av världen när exempelvis världshaven sjönk, då alltmer vatten bands upp i de växande inlandsisarna. När isarna hade som störst utbredning för cirka 20 000 år sedan beräknas världshavet ha varit 120 meter lägre än idag. Nya levnadsmönster utvecklade sig. Det blev tuffare att överleva i exempelvis Europa, men framför allt i nuvarande Indiska oceanen torrlades nya områden som dessutom gav människor möjlighet att befolka Australien. Istiden anses även ha bidragit till att vår närmaste släkting, Neanderthalaren, dog ut. Klimatet under istiden var sällan stabilt under några längre tidsperioder, bland annat på grund av att havsströmmar, som Golfströmmen, verkar ha varit instabila och ofta ändrats i styrka.

Det var nog inte kylan i sig som var det största problemet för människorna under istiden, utan snarare variationerna i klimatet. De medförde att vi fick förflytta oss, och leva som jägare och samlare. Under korta tidsperioder var kanske vissa människogrupper mer eller mindre bofasta, men troligen aldrig så länge att nästa generation kunde ta över och bygga vidare på en boplats, eller för att det skulle vara lönt att tämja djur och ha som boskap. Den värmeperiod, eller interglacial, som nu har pågått i cirka 11 700 år, har däremot varit mycket stabil när det gäller klimatet, vilket utan tvivel har bidragit till att forma den värld vi lever i. Vi hade antagligen inte kunnat bygga upp vårt komplicerade samhälle, med storskaligt jordbruk, urbanisering och industrialisering, om det inte vore för det stabila klimatet, som vi nu alltså kan vara på väg att lämna.

De senaste 200 åren

På en längre tidsskala är vi nu långsamt på väg mot nästa istid, av de tidigare nämnda astronomiska skälen. Den skulle troligen ha dröjt ytterligare fem eller tiotusen år, och avkylningen skulle under de närmaste århundradena troligtvis varit några hundradels grader, vilket knappast hade inneburit några stora utmaningar att hinna anpassa oss.

Men när vi började använda kol och olja i stor omfattning på 1800-talet ändrades förutsättningarna. Den långsamma temperatursänkning som tycks ha präglat jorden, åtminstone de senaste tusen åren, förbyttes i uppvärmning (se figur 1). Orsakerna



Figur 1: Jordens medeltemperatur har stigit med omkring 1 grad sedan början av 1900-talet. (Källa: Naturvårdsverkets bok Monitor 23 En varmare värld (2016).)

är huvudsakligen utsläpp av koldioxid från förbränning av fossila bränslen och skövling av skog.

Under det tidiga 1800-talet, innan den industriella revolutionen slog igenom, låg atmosfärens koldioxidhalt på 280 ppm (miljondelar), och mätningar från iskärnor på Grönland och Antarktis visar att andelen varit nära 280 ppm under cirka 10 000 år innan dess. Men på grund av våra utsläpp har halten ökat och passerade i maj 2013 för första gången på troligen tre miljoner år 400 ppm. Andelen koldioxid ökar för närvarande med två till tre ppm per år, och det är tyvärr svårt att se hur vi skulle kunna undvika att nå 450 ppm i slutet av 2030-talet och sedan troligen även 500 ppm senare under århundradet. Hur snabb och stor ökningen blir beror främst på den internationella klimatpolitiken och globala överenskommelser.

Sedan 1880 har den globala medeltemperaturen stigit med cirka 0,85 grader, skriver FN:s klimatpanel, IPCC, i sin femte rapport, hösten 2013. Och de senaste tre åren, 2015–2017, har värdet till och med varit lite drygt en grad över det förindustriella. En grad låter kanske inte så mycket. Men IPCC skriver även att det kommer ta tusen år eller mer, innan vi ser hela effekten av de utsläpp vi hittills har orsakat. Det beror på de återkopplingar i klimatsystemet som jag skrev om tidigare. De leder till en tröghet i förändringarna, som å ena sidan är bra eftersom de ger oss tid att

agera, men å andra sidan inte alls är bra, eftersom vi som lever idag inte fullt ut ser och förstår vad vi orsakar.

Men det är inte bara förstärkningen av växthuseffekten som påverkar och förändrar klimatet. Under perioden 1930–1970 steg temperaturen bara marginellt, trots att det var då som utsläppen av växthusgaser började öka ordentligt. Troligen berodde det på att kolkraftverken inte bara släppte ut koldioxid, utan även stora mängder svavel. När svaveldioxid reagerar med vattenånga bildas små sulfatdroppar – aerosoler – på hög höjd. Aerosolerna reflekterar solljus och verkar alltså avkylande – en effekt som kallas ”global dimming”. När man framför allt i Europa och Nordamerika införde rökgasrening i stor skala minskade svavelutsläppen och aerosolernas dämpande inverkan på uppvärmningen avtog. Utsläppen av partiklar är fortfarande stora i delar av Asien och Latinamerika där de därigenom maskerat en stor del av den uppvärmning som växthusgaserna har orsakat. Växthusgaserna sprider sig relativt snabbt över hela jordklotet och stannar dessutom kvar länge i atmosfären – det kan handla om hundratals eller tusentals år. Partiklarna sprids däremot endast över mindre områden och stannar bara kvar i atmosfären under som mest veckor eller månader. Partiklarna har alltså enbart en lokal eller regional påverkan. Den dag man även har renat utsläppen i Asien och Latinamerika lär det därför bli betydligt varmare i de delarna av världen – ännu ett exempel på hur situationen antagligen är betydligt allvarligare än vad vi märker av idag.

Strålningsbalansen

Vi vet alltså att vi människor har rubbat klimatet genom att förbränna fossila bränslen, skövla skog och genom utsläpp av andra växthusgaser (se sidorutan här intill). Det vi har gjort är att påverka den så kallade strålningsbalansen. Jorden avger för närvarande inte lika mycket energi som den tar emot, och kommer därför att värmas upp tills balansen är återställd – något som lär ta hundratals år. Om vi hade observerat jorden utifrån rymden under de senaste hundra åren, och följt hur temperaturen förändrats genom att mäta den utgående värmestrålningen, hade vi trott att klimatet på planeten hade blivit kallare, inte varmare. Växthusgaserna har helt enkelt bättrat på isoleringen kring planeten, och mindre av värmen vid marken sipprar ut genom atmosfären till rymden.

Förenklat kan man säga att jordytan – inklusive oceanerna – i

De andra växthusgaserna

I debatten pratas det mest om koldioxid. Men det finns även andra växthusgaser. De viktigaste är vattenånga, metan, freoner, dikväveoxid och ozon.

Vattenånga förekommer naturligt i atmosfären och står för större delen av växthuseffekten. Vattenångan har en viktig förstärkande roll i klimatförändringarna. Varm luft kan innehålla mer vattenånga än kall. Den uppvärmning som koldioxidutsläppen orsakar leder därför till att det blir mer vattenånga i atmosfären, vilket i sin tur förstärker växthuseffekten och spär på uppvärmningen ytterligare.

Metan är en mycket stark men kortlivad växthusgas. Gasen anses ha cirka 30 gånger starkare klimatpåverkan än koldioxid i ett hundraårsperspektiv. Men eftersom metan bryts ner till koldioxid redan efter 10–20 år är det mer relevant att titta på gasens klimatpåverkan i ett tjugoårsperspektiv, då den är drygt 80 gånger kraftfullare än koldioxid. Sedan 1800-talet har halten i atmosfären nästan tredubblats, från cirka 700 ppb (miljarddelar) till nästan 1900 ppb. Vi orsakar utsläpp av metan främst i samband med läckage vid utvinning av olja och naturgas, då naturgasen till största delen består av metan. Idisslande djur och risfält är andra viktiga metankällor, tillsammans med vårt eget matavfall. Det finns även en risk att de metanhydrater som för närvarande ligger frysta i områden med tundra och på havsbottnen i Arktis, i ett varmare framtida klimat kan tina och leda till ökande mängder av metan i atmosfären – ännu ett exempel på en självförstärkande återkoppling.

Halokarboner (freoner) påverkar inte bara ozonskiktet utan även växthuseffekten. Montrealprotokollet förbjöd användningen av vissa freoner och det har lett till en viss minskning av koncentrationerna i atmosfären. Även om de förekommer i betydligt mindre mängder i atmosfären än de tidigare nämnda gaserna kan de på sikt få en stor klimatpåverkan eftersom de stannar kvar länge och kan ha en klimatpåverkan per molekyl som är 1000-tals gånger större än koldioxiden.

Dikväveoxid (lustgas) har ökat i atmosfären, sannolikt på grund av konstgödning inom jordbruket – bakterier omvandlar nämligen gödsel till lustgas. Eftersom lustgas har 300 gånger större påverkan än koldioxid, per molekyl, leder redan ganska små utsläpp till en stor påverkan. Den lustgas som används inom förlossningsvården fångar man idag vanligen in och bryter ner till kväve och syre.

Ozon förekommer såväl högt upp i stratosfären – ozonskiktet – som i form av industriella föroreningar närmare marken. Medan ozonet i stratosfären skyddar oss från farlig UV-strålning bidrar ozonet på marknivå till att förstärka växthuseffekten.

genomsnitt under dygnet tar emot 240 watt kortvågig solenergi per kvadratmeter. Om klimatet vore i balans och temperaturen stabil skulle lika mycket energi stråla ut från jorden, men då till stor del i form av osynlig långvågig värmestrålning. Men riktigt så är det inte. Sedan förindustriell tid, dvs. mitten av 1700-talet, har dels den ökade mängden av växthusgaser hejdat utstrålningen av värme, dels ett antal andra faktorer spelat in. FN:s klimatpanel IPCC angav följande uppskattningar i sin rapport 2013. Siffrorna anger hur många fler watt per kvadratmeter jorden tar emot av den långvågiga värmestrålningen till följd av ökningen av olika växthusgaser – strålning som alltså annars hade tagit sig igenom atmosfären och lämnat jorden. Osäkerhetsintervaller finns inom parentes.

Koldioxid (CO_2):	1,68 (±0,35)
Metan (CH_4):	0,97 (±0,23)
Freoner:	0,18 (±0,17)
Lustgas/dikväveoxid(N_2O):	0,17 (±0,04)

Ökningen av växthusgaserna står alltså sammanlagt för en påverkan av cirka 3 watt per kvadratmeter. En stor del beror på förbränning av kol, olja och gas. Men även produktion av cement, jordbruket, avskogningen och djurhållningen spelar in.

IPCC räknar även med att solaktiviteten har ökat något de senaste 200 åren. Osäkerheten är stor, men i senate rapporten uppskattar man effekten till 0,05 watt per kvadratmeter. Solen har dock gått in i en fas med mindre aktivitet nu under inledningen av 2000-talet, jämfört med de sista årtiondena på 1900-talet.

Men störst osäkerhet är det kring partiklarnas påverkan, bland annat för att de små sulfatdropparna verkar på två sätt. Dels reflekterar de solstrålning, dels påverkar de molnbildningen. Troligen har aerosolerna sedan förindustriell tid gett en avkylan-

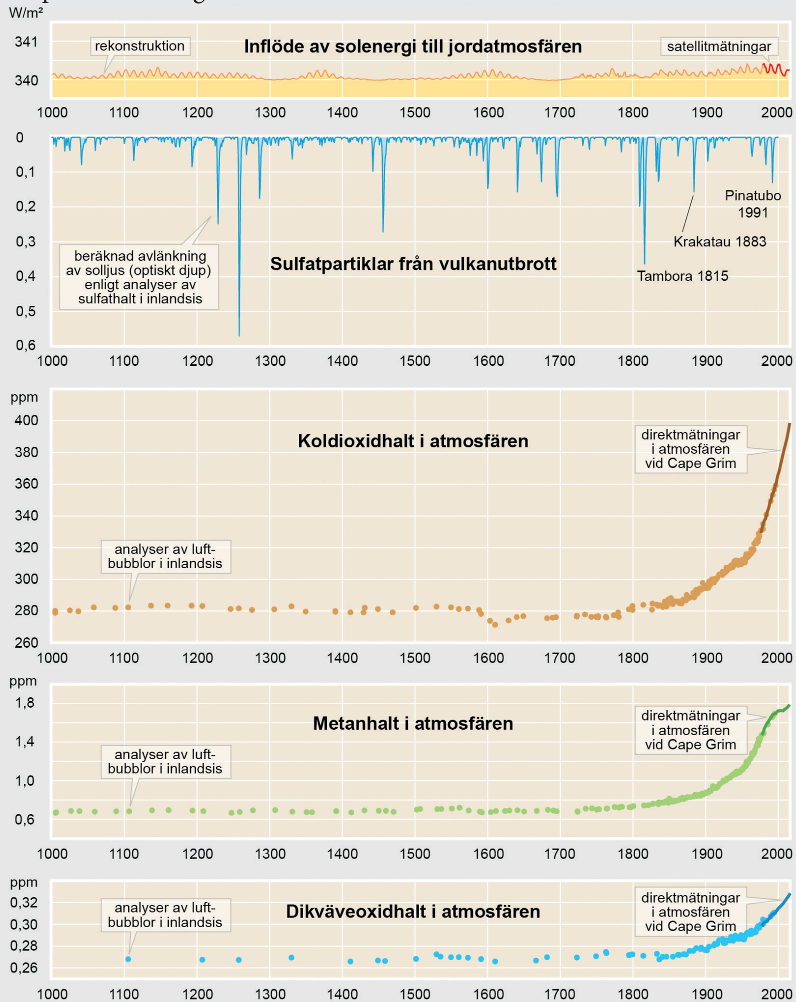
Vilka faktorer kan påverka jordens klimat?

Det finns flera olika faktorer som skulle kunna påverka jordens globala medeltemperatur. Mest uppenbar är kanske instrålningen av energi från solen, som varierar något med solens aktivitetscykel med solfläckar på ungefär 11 år. Men dessa variationer är mycket små och påverkar inte klimatet nämnvärt (högst med någon tiondels grad), och inte heller på ett sätt som stämmer överens med de betydligt större förändringar vi ser.

En annan faktor är vulkanutbrott, som höjer halten av sulfatpartiklar i

atmosfären. Dessa partiklar har en avkylande effekt, eftersom de hindrar en del av solljuset att nå jordytan. Man har sett mindre effekter på den globala medeltemperaturen efter stora utbrott, men dessa är kortvariga och avklingar vanligen efter bara något år då partikelslöjorna lagt sig.

En tredje faktor är halten av växthusgaser i atmosfären. Mängden av koldioxid, metan och dikväveoxid i atmosfären har stigit sedan 1800-talets mitt till följd av människans utsläpp, som framgår i figur 2. Till skillnad från variationerna i solinstrålning eller i halten av vulkaniska sulfatpartiklar, stämmer denna ökning av växthusgaser väl överens med hur jordens medeltemperatur har stigit under det senaste seklet.



Figur 2: Diagrammen visar variationen under de senaste 1000 åren i solinstrålning, partiklar från vulkaner, samt halter i atmosfären av tre olika växthusgaser. (Källa: Naturvårdsverkets bok Monitor 23 En varmare värld (2016).)

de effekt på i storleksordningen 1 watt per kvadratmeter. Det är angeläget att få ett exaktare värde på detta. Om aerosolerna kyler mycket, får vi ännu större problem med uppvärmning i framtiden när kolkraften blir renare eller fasas ut.

Vi har alltså orsakat en obalans mellan inkommande solstrålning och utgående värmestrålning. Den globala uppvärmningen kommer att fortsätta så länge den obalansen finns kvar. Jorden kan nå en ny strålningsbalans antingen vid en högre temperatur än idag eller genom att påverkan från oss människor minskar. Det senare innebär inte bara att utsläppen av växthusgaser minskar – de måste så gott som helt upphöra, och vi behöver även utveckla metoder att ta bort en del redan gjorda utsläpp. Så länge de växthusgaser vi redan har släppt ut i atmosfären stannar kvar så kommer de fortsätta att värma upp planeten. Den här fördröjningen gör att vi först om ett antal årtionden, då en ny strålningsbalans har uppnåtts, kan se och uppmäta den uppvärmning som vi redan har orsakat.

Klimatkänsligheten

Begreppet klimatkänslighet är centralt för att beräkna hur stor uppvärmningen blir av en viss ökning av växthusgaserna. Mycket av den forskning som bedrivs siktar till att nå ett så exakt värde som möjligt, men osäkerheterna är ännu stora.

Klimatkänslighet definieras som den uppvärmning en fördubbling av koldioxidhalten leder till. För att försöka beräkna den använder forskarna flera metoder. Studier av forntida klimatförändringar – paleoklimatologi – kan ge viktiga ledtrådar. Men forskarna använder även datormodellering som utgår från det vi vet om hur olika faktorer påverkar klimatet.

FN:s klimatpanel slog 2013 fast att en fördubbling av koldioxidhalten bör leda till 1,5–4,5 graders uppvärmning. Högre eller lägre värden kan inte uteslutas, men den mest sannolika klimatkänsligheten anses alltså vara kring 3 grader, med en mycket stor osäkerhet. Vi vet helt enkelt inte mer än så om det ytterst komplicerade klimatsystemet. Mycket av klimatpolitiken måste därmed handla om riskbedömningar.

Den förindustriella CO_2-halten låg på 280 ppm. En klimatkänslighet på 3 grader skulle alltså innebära att en halt på 560 ppm troligen leder till en cirka 3 grader varmare jord – inte omedelbart, men när strålningsbalansen åter kommer i jämvikt.

Men varför denna osäkerhet? En viktig anledning är att forskarna ännu inte riktigt vet hur uppvärmningen påverkar molnbildningen. Moln kan verka åt två håll. De kan reflektera solljus och därmed kyla, och de kan hejda strålningen från jordytan och därmed värma. Molniga dagar blir svala medan molniga nätter blir ljumma. Man vet fortfarande inte riktigt hur de olika effekterna kommer att slå i en varmare värld. I exempelvis södra Europa kan vi sommartid räkna med minskad molnighet i takt med att klimatet blir allt torrare. Där leder i så fall minskad molnighet till ytterligare uppvärmning. Hos oss i norra Europa pekar klimatmodellerna på att det vintertid skulle kunna bli ökad molnighet och ett nederbördsrikare klimat. Här är det i så fall i stället den ökade molnigheten som leder till ytterligare uppvärmning.

Dessutom är osäkerheten stor vad gäller andra återkopplingar. När glaciärer och havsis smälter tar jorden emot mer värme, eftersom den reflekterande snön och isen försvinner. Jorden ändrar då sitt albedo och blir mörkare. Det kan sedan leda till att ännu mer snö och is smälter, och att vi hamnar i en självförstärkande process.

När norra halvklotets permafrost nu börjar tina, avger dessutom mark samt sjö- och havsbottnar mer koldioxid och metan. De senaste åren har så kallade ”metan-kratrar”, i framför allt Sibirien, uppmärksammats i media vid flera tillfällen, när stora mängder metan hastigt frigjorts från den tinande tundran och efterlämnat hål som påminner om en krater efter en kraftig explosion. Den här återkopplingen är svår att räkna på, eftersom vi inte vet hur stor den kan bli. Den återfinns för det mesta inte i klimatmodellerna, just på grund av denna osäkerhet. Paleoklimatologiska studier tyder dock på att redan måttliga temperaturförändringar kan sätta igång processer som leder till omfattande klimatförändringar. Det är bakgrunden till att flera forskare idag förespråkar en sträng försiktighetslinje, och menar att redan dagens koldioxidhalter är farligt höga.

FN:s klimatpanel uppskattar i sin femte rapport att vi från 2011 kan släppa ut ytterligare cirka tusen miljarder ton koldioxid och ändå ha 66 procents chans att hålla oss under två graders uppvärmning. Det skulle innebära att vi maximalt kan använda 10–20 procent av de kända utvinningsbara fossilreserverna innan vi måste vara nere på noll utsläpp och ha ett helt fossilfritt samhälle. Eller omvänt: 80–90 procent av de kända fossila tillgångarna måste

stanna kvar i marken! Det är en slutsats som beslutsfattare och ekonomer runt om i världen tyvärr inte alls har tagit till sig. Fortfarande investeras i nya kolgruvor, och fortfarande är det tillåtet att försöka få upp mer olja, i exempelvis Arktis.

Koldioxidbudgeten

Hur mycket är då tusen miljarder ton koldioxid? Det kan låta mycket; sedan industrialiseringen har vi globalt släppt ut närmare det dubbla. Men med utsläpp i storleksordningen trettiofem miljarder ton per år under 2010-talet återstår det från 2018 nu bara 750 miljarder ton. Av denna ”koldioxidbudget” har vi alltså redan bränt upp en fjärdedel.

Fördelar vi kvarvarande 750 miljarder ton lika bland oss lite drygt sju och en halv miljard som nu lever på planeten återstår 100 ton var – under resten av våra liv. Vi i Sverige släpper varje år ut drygt 10 ton per person, från vår konsumtion. Om alla människor i världen levde som vi skulle budgeten alltså inte ens räcka i tio år.

Vi närmar oss en punkt där så gott som all återstående fossil energi behöver stanna kvar i marken. Vi kan göra undantag om vi

Hur växthusgaserna hindrar värmestrålningen att lämna jorden

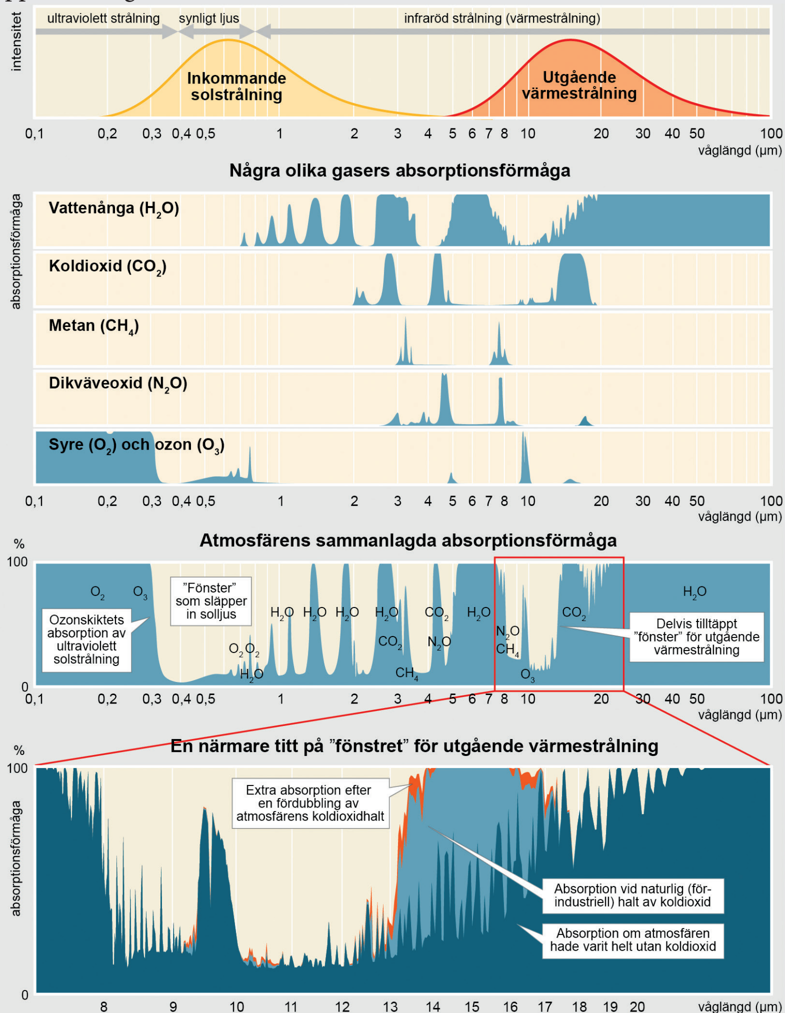
Den elektromagnetiska strålning som når jorden från solen består av relativt korta våglängder, och har sitt intensitetsmaximum i det synliga ljuset, med våglängder i storleksordningen 0,5 µm. Den värmestrålning som jorden avger är mer långvågig, med typiska våglängder på 10–30 µm. Detta framgår av det översta diagrammet i figur 3, som visar våglängdsinnehållet för både den inkommande solstrålningen och den utgående värmestrålningen.

Det som gör en gas till en växthusgas är, som vi sett, dess förmåga att absorbera den långvågiga utgående värmestrålningen, så att den därmed gör det svårare för värmen att lämna jorden. I diagrammen i figur 3 visas hur absorptionsförmågan hos några olika gaser i atmosfären varierar med våglängden. Notera att atmosfären är ganska genomskinlig för den inkommande solstrålningen, men att en hel del av den utgående värmestrålningen absorberas. Notera också att koldioxid har en absorptionstopp mitt i våglängdsområdet för den utgående strålningen. Det nedersta diagrammet i figur 3 zoomar in i detta kritiska våglängdsområde.

Av diagrammen framgår att absorptionen är 100-procentig för vissa våglängder. Detta betyder dock inte att det är omöjligt för strålning med dessa våglängder att lämna atmosfären, utan bara att sådan strålning alltid fångas upp av någon absorberande molekyl för att sedan sändas ut igen i en slumpmässig riktning, en eller flera gånger innan den slutligen lyckas nå ut

i rymden. Växthusgaserna *försenar* alltså strålningen i dess väg bort från jorden, varvid en del av dess energi blir kvar i atmosfären och förstärker växthuseffekten.

I det nedersta diagrammets inzoomade våglängdsområde är effekten av en dubblering av koldioxidhalten rödmarkerad. Det kan förefalla som att en sådan dubblering inte skulle göra någon skillnad i våglängdsområdet mellan 14 och 16 µm, där absorptionen redan är total. Men detta är alltså inte så. All strålning med dessa våglängder absorberas och återutsänds visserligen redan, men en dubblering av koldioxidhalten kommer att ytterligare försena strålningens väg genom atmosfären och på så vis bidra till ökad uppvärmning.



Figur 3: Växthusgasernas inverkan på strålningen i jordens atmosfär. (Källa: Naturvårdsverkets bok Monitor 23 En varmare värld (2016).)

använder det fossila för att ställa om och bygga ett hållbart samhälle. Inget kol, ingen naturgas, ingen olja i andra sammanhang – och därmed inte heller någon bensin, diesel eller fossilt bränsle till flyget.

Och denna budget ger oss ändå bara 66 procents sannolikhet att lyckas med tvågradersmålet. De framtida utsläppen som FN:s klimatpanel beskriver ger alltså en betydande risk att uppvärmningen överstiger två grader, trots en framtida omställning till ett fossilfritt samhälle. Skulle vi vara beredda att acceptera så stora risker i en så avgörande fråga i något annat sammanhang?

Vissa klimatdebattörer varnar därför också att vi redan nu kan ha släppt ut för mycket koldioxid för att undvika stora följdproblem av den globala uppvärmningen. Det finns forskning som pekar på att vi borde sträva efter att stabilisera mängden CO_2 under 350 ppm, alltså betydligt under nuvarande cirka 410 ppm. Den numera pensionerade chefen för NASA:s klimatforskning James Hansen publicerade 2008, tillsammans med ett antal kollegor, en artikel med titeln: *Target Atmospheric CO_2: Where Should Humanity Aim?*[1] Hansen har även skrivit om sin forskning i den populärvetenskapliga boken *Storms of my Grandchildren*[2]. Som titeln antyder beskriver han de klimatförändringar och extrema vädersituationer som hans barnbarn kan få uppleva i framtiden.

Hansen menar att vi måste se till att sänka halten av CO_2 i atmosfären till under 350 ppm av två skäl. Dels för att vara någorlunda säkra på att verkligen nå tvågradersmålet, dels för att minimera risken för självförstärkande återkopplingar, som även utan vidare utsläpp skulle leda till fortsatt uppvärmning.

Uppvärmningens effekter

Den globala uppvärmningen kommer att förändra vår värld. Tecknen syns redan och allt talar för att vi bara sett början. Redan den mängd växthusgaser som vi hittills släppt ut garanterar ytterligare några tiondelars temperaturstegring, eftersom strålningsbalansen är rubbad och det dröjer innan en ny jämvikt uppnås. Om större delen av svavelpartiklarna på sikt försvinner från vår atmos-

1 James Hansen et al (2008): *Target Atmospheric CO_2: Where Should Humanity Aim?* Open Atmos. Sci. J., vol. 2, pp. 217–231. (DOI: 10.2174/1874282300802010217)

2 James Hansen (2011): *Storms of My Grandchildren: The Truth About the Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity*. Bloomsbury Publishing PLC.

får kan det innebära en ytterligare uppvärmning på en halv grad, eller kanske mer. Eftersom vi redan har fått en uppvärmning på lite över en grad minskar därmed möjligheterna snabbt att klara tvågradersmålet, trots att så gott som alla världens länder i dag säger sig vara överens om det. Parisavtalet, som trädde i kraft i november 2016, säger att världens länder ska föra en klimatpolitik för att undvika alltför farliga klimatförändringar, genom att hålla den globala temperaturökningen väl under två grader, med strävan att den ska stanna vid 1,5 grad.

Miljöorganisationer har länge ansett att det målet är otillräckligt om vi ska kunna undvika stora negativa konsekvenser i framtiden. Och det oavsett om vi mäter de negativa konsekvenserna i form av ekonomi, mänskligt lidande, sämre skördar, minskad biologisk mångfald eller risken för andra allvarliga följdverkningar – sådana som vi idag kanske inte ens är medvetna om att de utgör en risk. ”Expect the unexpected!”

Den globala uppvärmningen kommer att föra med sig ett flertal problem, såsom extremare väder, högre vattenstånd och minskad biologisk mångfald (se vidare sidorutan här intill). Men ännu mer oroande är kanske risken att vi når så kallade *tipping points – tröskeleffekter*, som gör att uppvärmningen fortskrider ett bra tag till även sedan vi slutat att släppa ut växthusgaser. Jag har redan nämnt avsmältningen av Arktis som gör att havet tar emot mer värme, samt upptiningen av permafrosten som orsakar ytterligare metan- och koldioxidutsläpp. Ju varmare haven blir desto sämre kommer de bli på att lagra kol. Vi kan jämföra med ett glas kall öl eller läsk, där kolsyran blir kvar så länge som drycken hålls kall. Men när drycken blir varmare, när exempelvis isen i läskglaset smälter, försvinner kolsyran i form av koldioxid upp i luften – och läsken eller ölen blir avslagen. Det finns alltså en risk för att en del av de utsläpp som vi orsakade under 1900-talet, och som för närvarande finns lagrade i haven, återvänder till atmosfären i framtiden när haven blir varmare. Då får vi en förstärkning av växthuseffekten, även om vi då i framtiden har skapat ett helt fossilfritt samhälle. En annan tröskeleffekt forskarna oroar sig för är att stora regnskogsområden som Amazonas ska gå under i skogsbränder, som i så fall kan frigöra stora mängder koldioxid. Det är inte minst mot bakgrund av dessa risker som allt fler klimatforskare idag menar att det vore ytterst farligt om den globala uppvärmningen blir större än 1,5 grader.

Effekter av en global uppvärmning

Vattencykeln blir mer intensiv. I en varmare värld avdunstar mer vatten, vilket tenderar att göra marken torrare. Detta vatten måste förr eller senare falla någonstans i form av regn. Detta kommer att leda till ökad torka på vissa ställen och mer nederbörd på andra. Regnen kommer dessutom att bli kraftigare och därmed öka risken för översvämningar. Tyvärr tyder mycket på att det är på väg att bli torrare där det redan är torrt och blötare där det redan är blött.

Mycket kraftiga orkaner kommer troligen att bli vanligare i vissa delar av världen, oväder som i sin tur drar med sig ökade mängder regn. Huruvida det totala antalet orkaner kommer att öka, eller rentav minska, är däremot osäkert. Allmänt när det gäller ”oväder” av olika slag är det stora osäkerheter. Här hemma i Sverige kanske det trots allt inte behöver bli alltför stora förändringar. Möjligen kan risken för ”höststormar” öka på vintrarna, med isfria hav. Och enstaka skyfall kan bli intensivare, framför allt på somrarna, med mer energi i atmosfären. Men även om risken för fler eller värre stormar kanske inte är så stor i Sverige, ökar trots det risken för mer omfattande stormskador – framför allt i skogarna. Med längre perioder utan tjäle står träden sämre när det blåser.

Havsnivån kommer att höjas, och ställa världens kustnära och låglänta områden under vatten. Det är en långsam process, men den kommer att pågå långt in i framtiden. För närvarande stiger nivån med drygt 3 mm om året, framför allt beroende på att varmare vatten ökar i volym, men även som en effekt av smältvatten från landbaserade glaciärer, som på Grönland. En fortsatt uppvärmning kommer att leda till större avsmältning av glaciärerna, osäkert dock hur stor. Så uppskattningarna av vad som händer fram till år 2100 varierar kraftigt; IPCC anger i sin senaste rapport ett brett intervall på 26–82 cm. Vissa forskare menar dock att höjningen kan komma att bli betydligt större. SMHI ger exempelvis rådet till kommuner i Sverige att planera för en höjning på storleksordningen 1 meter till år 2100. Det här är dessutom ett exempel på en process som sedan lär fortsätta under större delen av årtusendet, och kanske längre.

Extrema värmeböljor har redan blivit vanligare, och vi har bara sett början. Den högsta godkända temperaturen som uppmätts i världen är 54,0 grader; i Death Valley, USA, 2013 och i Kuwait 2016. (De tidigare ”världsrekorden” på 58 grader i Libyen 1922, 56,7 grader i Death Valley 1913 och 55 grader i Tunisien 1931, har på senare tid underkänts som felaktiga, eftersom vädersituationerna vid dessa tillfällen inte bedömts kunna leda till så höga temperaturer.)

Förutom att värmen leder till fler dödsfall bland äldre och sjuka blir resultatet fler skogs- och gräsbränder. Skogsbränderna leder i sin tur till en

självförstärkande återkoppling, eftersom de frigör kol från träden, kol som hamnar i atmosfären i form av koldioxid, vilket leder till att växthuseffekten förstärks ytterligare. Skogsbränderna leder dessutom till stora mängder sot som kan göra marken mörkare, även i områden långt bort från själva branden. Ett exempel på det är sot som faller över glaciärer i Alperna, och som kommer från skogsbränder i Medelhavsområdet. Mörkare mark leder till att marken absorberar mer av energin i solens strålar, och därmed ytterligare höjer temperaturen.

Den biologiska mångfalden kommer att påverkas starkt – antalet arter kommer att minska. Till de tidigaste effekterna hör att korallreven påverkas negativt. Det är något vi redan ser. Det påverkar i sin tur havens näringskedjor. Många landlevande arter kommer att dö ut eftersom de inte hinner anpassa sig till snabba klimatförändringar som påverkar lokal flora och fauna.

Havet försuras vilket riskerar att leda till att många vattenlevande arter dör ut. Försurningen är en följd av att en stor del av den koldioxid vi släpper ut lagras i havet och där bildar kolsyra när det blandas med vattnet. Arter som är beroende av att bilda skal får svårare att klara sig, då försurningen bidrar till allt svagare kalkhaltiga skal och yttre skelett. Det gäller alltifrån plankton till snäckor och större kräftdjur. Även korallerna påverkas.

Det är inte längre bara klimatforskare som oroar sig för klimatförändringarna och skickar varningssignaler. Idag är det även ekologer och andra experter på biologisk mångfald och ekosystem, samt inte minst de tvärvetenskapliga forskare som får en allt bättre bild av mänsklighetens påverkan på planeten jorden. Det är en omfattande och komplicerad påverkan, där klimatförändringarna bara är ett exempel bland flera.

Viktigt med klimatanpassning

Klimatförändringarna på grund av en varmare planet kommer alltså att fortsätta i många årtionden till även om vi ställer om till ett fossilfritt samhälle – när det gäller stigande världshav till och med århundraden. Därför behöver vi även parallellt satsa mycket mer på klimatanpassning och beredskap för extrema väderhändelser av olika slag. Vi måste höja vår medvetenhet och beredskap; både som individer och som samhälle.

Det behöver bli lättare och billigare att göra rätt – men ännu viktigare är att det blir svårare och dyrare att göra fel; i förläng-

ningen även olagligt. När det gäller klimatfrågan är det ganska enkelt. Fel är att gräva upp fossil energi och att minska biomassan – genom att exempelvis skövla skog. Rätt är att utveckla metoder inom jordbruk och skogsbruk som binder kol från atmosfären och aktivt försvagar växthuseffekten. Utifrån de förutsättningarna kan vi skapa ett samhälle utan klimatpåverkan.

Det är viktigt att behålla ett hopp inför framtiden och en övertygelse om att vi kan lyckas med omställningen. Det finns ljus långt bort i tunneln. Teknikutvecklingen går framåt; elbilar, solceller, batterier och bränsleceller blir nu snabbt lönsamma.

Kunskapen om hållbarhetsfrågorna ökar snabbt. Vi står inför ett paradigmskifte när nu en yngre generation, som till stora delar är betydligt mer medveten än den äldre, får mer att säga till om när det gäller samhällsutvecklingen. Allt fler ekonomer pekar på det oekonomiska i att stanna kvar i det fossila samhället – och allt fler samhällsdebattörer börjar äntligen förstå att ekonomi och ekologi i grund och botten är samma sak.

Det handlar om att hushålla med begränsade resurser på bästa möjliga sätt – så att vi som lever på planeten idag kan leva ett bra liv – utan att göra det på bekostnad av kommande generationer. ❖

För vidare läsning

Claes Bernes (2016): *En varmare värld*. Naturvårdsverkets bok Monitor 23.

Claes Bernes och Pär Holmgren (2009): *Meteorologernas nya väderbok*. Medströms bokförlag.

Pär Holmgren (2014): *Det minsta vi kan göra är så mycket som möjligt*. Pärspektiv förlag.

Mark Lynas (2008): *Sex grader: Vår framtid på en varmare jord*. Ordfront förlag.

Andreas Malm (2010): *Det är vår bestämda uppfattning att om ingenting görs nu kommer det att vara för sent*. Atlas.